

# **Caractérisation des sécheresses des sols en France et changement climatique.**

## **Characterization of soil droughts in France and climate change**

### ***Résultats et applications du projet ClimSec***

*Jean-Michel Soubeyroux<sup>1</sup>, Nadia Kitova<sup>2</sup>, Michèle Blanchard<sup>1</sup>, Jean-Philippe Vidal<sup>3</sup>, Eric Martin<sup>2</sup>, Philippe Dandin<sup>1</sup>*

*1 : METEO-FRANCE, Direction de la Climatologie, 42 avenue G Coriolis 31057 Toulouse Cedex*

*2 : CNRM GAME, 42 avenue G Coriolis 31057 Toulouse Cedex*

*3 : Irstea, UR HHLY, UR Hydrologie-hydraulique, 3 bis Quai Chauveau, CP220, 69336 LYON Cedex 09*

### **Résumé :**

Le projet ClimSec a étudié l'impact du changement climatique sur la sécheresse et l'eau du sol en France en s'appuyant sur la réanalyse de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM) depuis 1958. Des indices standardisés « Standardized Precipitation Index » (SPI) et « Standardized Soil Wetness Index » (SSWI) ont été utilisés pour caractériser les différents types de sécheresse (météorologique et agricole) à partir d'une climatologie de 50 ans. En 2011, ces indices ont été adaptés pour le suivi hydrologique opérationnel et pour répondre aux besoins de qualification de la sécheresse printanière exceptionnelle de cette année.

Ces indices ont également été calculés en climat futur à partir des différentes projections climatiques régionalisées disponibles en métropole. Trois expériences particulières en matière de scénarios socio-économiques, de modèles climatiques, de méthodes de descente d'échelle ont permis d'apprécier l'importance relative des différentes sources d'incertitude dans l'évolution attendue des sécheresses. Ces données ont également permis de préciser les conditions de l'évolution temporelle des sécheresses, avec une aggravation plus rapide et plus intense des événements liés au déficit d'humidité du sol qu'au déficit de précipitation. Les projections climatiques indiquent surtout que notre pays risque de connaître lors de la seconde moitié du XXI<sup>ème</sup> siècle des sécheresses quasi-continues et de grande intensité, totalement inconnues dans le climat actuel.

## Abstract

The ClimSec project has studied the impact of climate change on drought and soil water over France by using a climatological reanalysis of the Safran/Isba/Modcou Isba suite (SIM) since 1958. Standardized drought indices for precipitation (SPI) and soil moisture (SSWI) have been defined for research purposes to characterize the various kinds of events. They were then adapted for operational hydrological monitoring and used to assess the exceptional drought of spring 2011.

These indices were also calculated for future climate from the various regionalized climate projections available over France. Three particular experiments in socio-economic scenarios, climate models and downscaling methods have been run to estimate the relative importance of the different uncertainties in drought evolution.

The assessment of 21<sup>st</sup> century drought evolution shows a much sooner and more intense occurrence of changes for agricultural droughts linked to soil moisture deficits than for meteorological drought linked with precipitation deficits. Climate projections suggest that France could be affected on the second half of the 21<sup>st</sup> century by a quasi-continuous drought with a strong intensity, totally unknown in present climate.

### Le projet ClimSec (2008-2011)

#### Un diagnostic complet sur les sécheresses des sols superficiels passées et futures

*ClimSec, projet de recherche sur les sécheresses des sols superficiels, s'est achevé en juin 2011. Lancé en mars 2008, il avait pour objectif de caractériser l'impact du changement climatique sur l'humidité des sols, et de produire de nouveaux outils pour les services en charge du suivi climatique.*

*Le projet a été mené par la Direction de la Climatologie de Météo-France avec le soutien de la Fondation MAIF et l'appui du CNRM-GAME, du CERFACS, du Cemagref et de l'UMR Sisyphe.*

*Les résultats du projet sont accessibles sur internet : <http://www.cnrm-game.fr/projet/climsec>*

## 1 Introduction

L'Europe du Sud et la France sont particulièrement concernées par les effets du changement climatique sur l'augmentation en fréquence et en intensité des sécheresses (GIEC, 2007). Les études menées sur l'évolution de la ressource en eau en France métropolitaine sont principalement intéressées aux paramètres météorologiques (précipitation notamment), ou hydrologiques tels que les débits ou les hauteurs des nappes. Ainsi, l'étude des longues séries

climatologiques de précipitation sur la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle en France a montré une tendance significative à l'augmentation des sécheresses estivales (Moisselin et Dubuisson, 2006). Les projections climatiques indiquent également que cette tendance devrait s'aggraver d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle avec une hausse de plus de 50% du nombre maximum de jours secs consécutifs en été (Planton et al., 2008). Les études d'impact en hydrologie convergent pour annoncer une baisse des débits moyens annuels des grands fleuves français au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Le débit moyen de la Garonne pourrait diminuer d'environ 11% dès le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle (Caballero et al., 2007) tandis que la baisse du débit de la Seine pourrait même atteindre près de 30% en fin de siècle (Ducharne et al., 2009).

L'objectif du projet ClimSec (Soubeyroux et al., 2011) était de caractériser les sécheresses en France en mettant l'accent sur l'évolution passée et future des réserves en eau des couches superficielles des sols dans les cas de situation extrême.

L'emploi d'un modèle physique sol-végétation-atmosphère pour l'étude de la ressource en eau plutôt qu'une approche paramétrique classique basée sur l'évapotranspiration est une des principales originalités de cette étude. La chaîne de modèles Safran-Isba-Modcou (SIM) qui a été utilisée, présente l'avantage d'être à la fois un modèle communautaire (Météo-France, Mines Paris Tech, Irstea), fruit de travaux de recherche entrepris depuis plus de 20 ans (Habets et al., 2008), et d'être intégrée à la production quotidienne opérationnelle de Météo-France (Soubeyroux et al., 2008). Les différentes valorisations de cette chaîne ont permis au fil des années de vérifier la capacité à reconstituer les évolutions passées et à représenter les projections futures. Cette modélisation hydrométéorologique, combinant une analyse quotidienne, précisée chaque mois et consolidée chaque année, permet en particulier de caractériser en permanence pour les autorités la situation du pays vis-à-vis de la ressource en eau (Soubeyroux et al., 2010).

Dans le cadre du projet ClimSec, une réanalyse de la chaîne SIM a tout d'abord été réalisée sur la période 1958-2008 et a fait l'objet d'une validation pour les études climatologiques (Vidal et al.,

2010a). Des indices ont été développés à partir des variables de la chaîne SIM pour caractériser les différents types de sécheresse liées à un déficit sur une composante spécifique du cycle de l'eau : précipitation, humidité des sols, débit des cours d'eau. Une climatologie originale des événements de sécheresse en France a été établie sur la période de 1958 à 2008 (Vidal et al., 2010b). La pertinence de ces travaux a été reconnue par l'attribution du prix Norbert Gerbier-Mumm 2011 de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

Cet article rappelle d'abord la méthodologie appliquée pour la caractérisation des sécheresses puis présente les outils opérationnels dérivés du projet et actuellement disponibles pour le suivi hydrologique en France, au travers de l'analyse de l'événement du printemps 2011. Enfin, les résultats des études à partir des projections climatiques régionalisées sur la France seront détaillés pour préciser l'évolution attendue des sécheresses au cours du XXI<sup>e</sup> siècle et les principales incertitudes associées.

## **2 La méthodologie de caractérisation des sécheresses**

### **2.1 Définition des indices de sécheresse**

Une sécheresse se définit comme un déficit hydrique d'une composante (au moins) du cycle hydrologique (Wilhite et Glantz, 1985). On distingue classiquement 3 types de sécheresse : les sécheresses météorologiques liées à un déficit du cumul de précipitations, les sécheresses agricoles ou édaphiques concernant l'humidité moyenne des sols et les sécheresses hydrologiques liées aux débits des cours d'eau ou au niveau des nappes. La variabilité des temps de réaction des aquifères, des cycles écologiques ou socio-économiques, impose de considérer les déficits hydriques sur différentes profondeurs temporelles, de quelques mois à quelques années.

De la même façon, la diversité des domaines d'application des sécheresses ne permet pas de disposer d'indices universels pour leur caractérisation. Toutefois, l'OMM a recommandé en 2009

l'utilisation du Standardized Precipitation Index (SPI) pour le suivi des sécheresses météorologiques.

Dans le cadre du projet ClimSec, la méthode de calcul du SPI (Mc Kee et al., 1993) a été appliquée aux données de la chaîne SIM sur le cumul de précipitation mais aussi sur la moyenne de l'humidité des sols, représentée par le Soil Wetness Index (SWI) :

$$SWI = \frac{w - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}}$$

où  $w$  représente le contenu intégré en eau du sol,  $w_{wilt}$  le contenu en eau au point de flétrissement et  $w_{fc}$  le contenu en eau du sol à la capacité au champ<sup>1</sup>.

La variable considérée au pas de temps mensuel (précipitation ou SWI) est cumulée/moyennée sur  $n$  mois glissants, puis les distributions statistiques de chaque mois calendaire sont ajustées sur des distributions continues. Elles sont ensuite projetées sur une loi normale centrée réduite pour calculer les valeurs d'indices associées. Cette méthode assure donc une cohérence spatiale de l'indice et une équivalence entre sa valeur et sa probabilité de non-dépassement. L'indice de sécheresse standardisé basé sur le SWI sera dénommé Standardized Soil Wetness Index ou SSWI dans le reste de l'article.

## 2.2 Caractéristiques locales des événements de sécheresse

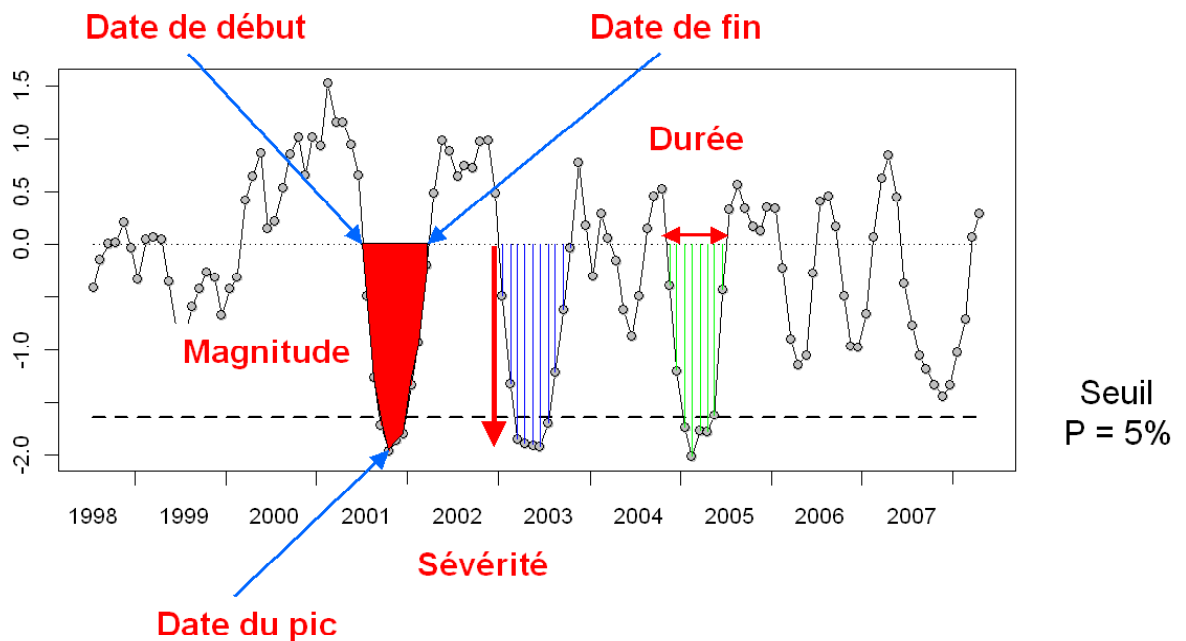
Les indices SPI et SSWI ont été calculés à partir des résultats de la réanalyse SIM à résolution 8 km sur la France (8602 mailles) avec une archive mensuelle débutant en 1958.

L'analyse des sécheresses à partir de ces indices standardisés permet alors d'identifier les événements indépendants à l'échelle locale et de déterminer leurs caractéristiques, comme indiqué sur la Figure 1. Cet exemple pour le SSWI calculé sur une période de 3 mois (SSWI3) d'une maille située près de Toulouse montre 3 événements franchissant le seuil de probabilité

---

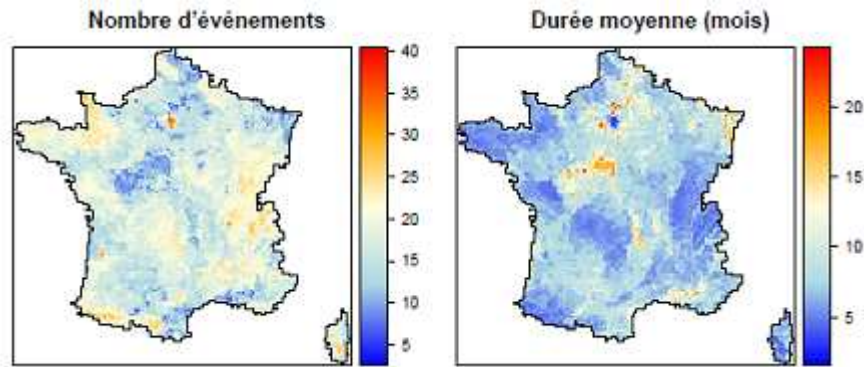
<sup>1</sup>-La réserve en eau d'un sol correspond à la quantité d'eau que le sol peut absorber ou restituer aux plantes. Le contenu en eau à capacité au champ correspond aux conditions d'un sol ressuyé où le drainage est assuré librement ; au point de flétrissement, l'eau est retenue par le sol avec des forces de succion supérieure à celle des racines.

d'occurrence 5% (équivalent d'une durée de retour de 20 ans) sur la période 1958-2008 et la manière dont sont définies les différentes caractéristiques événementielles: début de l'événement, durée, magnitude (valeur absolue de la somme des valeurs de l'indice durant l'événement, en mois) et sévérité (valeur absolue du minimum atteint). L'identification des événements de sécheresse peut alors être effectuée sur chacun des points de calcul, afin de mettre en lumière les spécificités régionales des caractéristiques des événements de sécheresse.



**Figure 1** : Définition des caractéristiques locales des événements de sécheresse (date de début et de fin, durée, magnitude, date du pic et sévérité). Exemple de l'évolution du SSWI3 de 1998 à 2008 sur une maille située près de Toulouse avec un seuil fixé à 5% (Soubeyrou et al., 2011)

Cette approche appliquée aux données de la réanalyse SIM a permis d'établir une climatologie à haute résolution des sécheresses en France : nombre d'événements, durée, intensité, périodes de déclenchement. Sur la Figure 2, relative à l'indice SSWI1 et au seuil de sécheresse de 10%, le nombre maximum d'événements est observé sur le relief et le Cotentin tandis que la durée moyenne des événements est maximale sur le Centre Ouest, la région Parisienne, les vallées de Limagne et d'Alsace ainsi que la Provence.



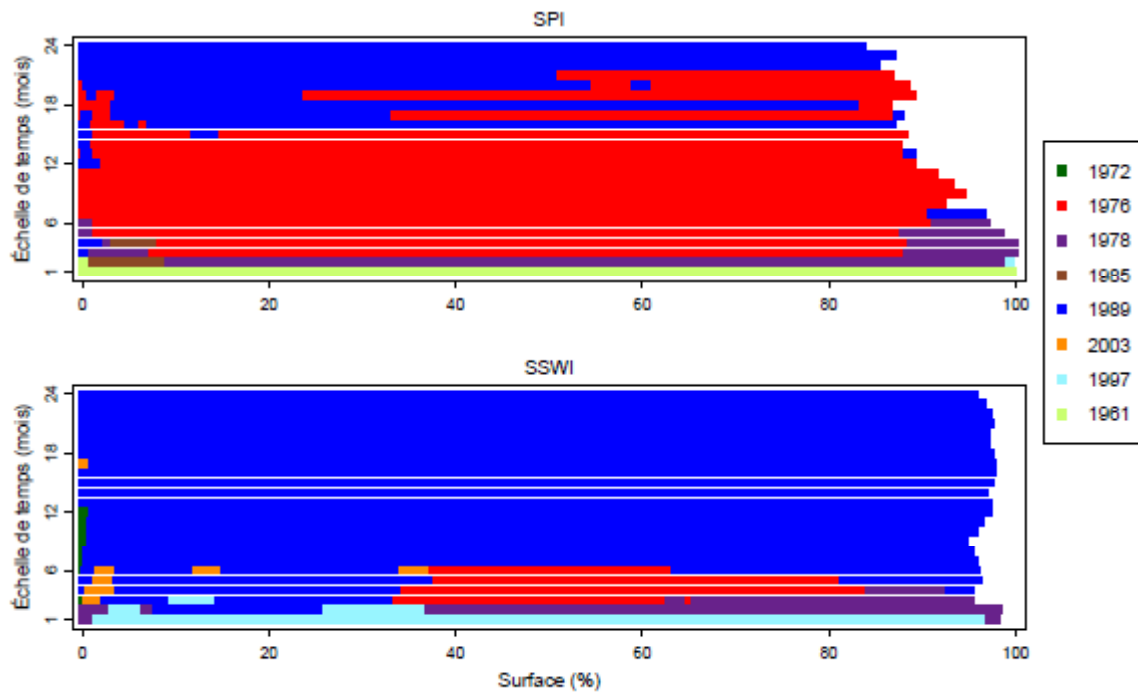
**Figure 2 :** Exemples de caractéristiques moyennes des événements de sécheresses sur la période 1958-2008, avec le SSWI-1 et un seuil de sécheresse fixé à 10% (Soubeyroux et al., 2011)

### 2.3 Analyses spatio-temporelles

L'analyse locale des sécheresses peut ensuite être complétée de différentes façons pour caractériser des événements dans leur dimension spatio-temporelle (Vidal et al., 2010b).

Pour identifier un événement à l'échelle nationale, il convient de définir des règles pour préciser à un instant donné quelle est la surface affectée par la sécheresse (choix d'un seuil, ici 20%) et suivre son évolution au cours du temps (algorithme de contigüité spatiale et continuité temporelle). La méthode employée dans le projet ClimSec (Vidal et al., 2010b) est dérivée des méthodes d'analyse cumul-surface-durée initialement appliquée aux précipitations orageuses. On peut identifier ainsi pour chaque indice de sécheresse, des événements nationaux et calculer leur durée et superficie moyenne, ainsi qu'une magnitude totale (définie comme la valeur absolue de la somme des indices dans l'espace-temps de la sécheresse), puis les comparer. Avec ces hypothèses, l'événement de sécheresse majeur en France sur la période 1958-2008 avec l'indice SPI3 est celui de 1976 (novembre 1975 à octobre 1976) tandis que pour le SSWI3, c'est celui de 1989-1990 (octobre 1988 à décembre 1990).

On peut aussi utiliser cette approche pour connaître quels événements ont conduit aux déficits les plus extrêmes pour une surface déterminée, région française ou bassin versant. La Figure 3 montre l'application de cette méthode sur les champs spatio-temporels de SPI et de SSWI aux différentes échelles de temps considérées, de 1 à 24 mois. Pour les sécheresses météorologiques, les déficits de l'année 1976 prédominent à l'échelle nationale pour des cumuls de précipitation sur 3 à 15 mois. Pour les sécheresses agricoles, l'événement de 1989 est le, plus sévère sur l'ensemble du territoire pour des moyennes d'humidité du sol sur 6 à 24 mois.



**Figure 3 :** Identification des événements ayant présenté la plus forte sévérité moyenne sur une surface donnée, pour des échelles de temps de 1 à 24 mois. Haut : sécheresses météorologiques; bas : sécheresses agricoles. Les événements sont identifiés ici par l'année où le déficit maximum de précipitation sur 1 mois a été atteint. (Soubeyroux et al., 2011)

### 3 Le suivi opérationnel des sécheresses

#### 3.1 Représentation cartographique opérationnelle

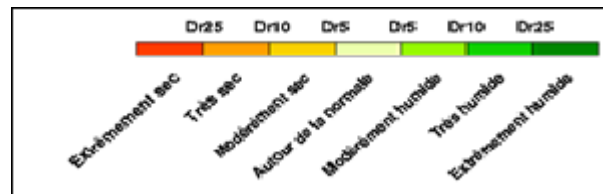
Dans une perspective opérationnelle, les différents indices de sécheresse ont été calculés en temps réel sur 4 échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois. Contrairement aux indices du projet ClimSec qui ont été calculés en prenant comme référence la totalité de la période de la réanalyse (1958-2008), les indices opérationnels s'appuient eux sur la période de la normale climatologique de référence<sup>2</sup> utilisée à Météo-France pour les activités de suivi climatique.

La représentation cartographique des indices a été adaptée sur la France, en liaison avec les utilisateurs pour faciliter la compréhension du caractère exceptionnel de la valeur d'un indice par son équivalence en termes de durée de retour. La Figure 4 présente la palette de visualisation et

<sup>2</sup> La normale climatologique de référence est depuis le 29 mai 2012 la période trentenaire 1981-2010

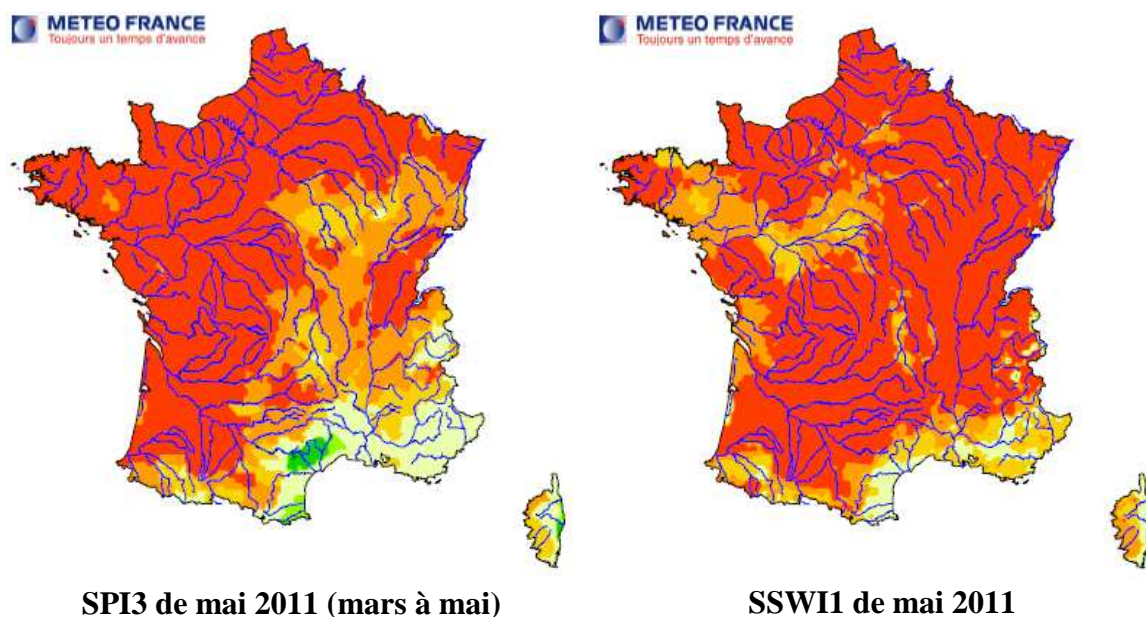


les seuils retenus avec les durées de retour inférieures à 5 ans (autour de la normale), entre 5 et 10 ans (modérément sec), entre 10 et 25 ans (très sec) et supérieures à 25 ans (extrêmement sec).



**Figure 4** : Légende développée pour la visualisation des indices de sécheresse standardisés prenant en compte l'équivalence entre la valeur de l'indice et la probabilité d'apparition du phénomène (durée de retour  $Dr$ ).

Cette représentation permet de représenter directement le caractère local exceptionnel d'une sécheresse. La Figure 5 montre l'intensité de la sécheresse atteinte sur la France au printemps 2011: la sécheresse météorologique est considérée sur la période de mars à mai (indice SPI3) et la sécheresse agricole sur le seul mois de mai (SSWI1). La sécheresse météorologique du printemps 2011 présente un caractère extrême (durée de retour supérieure à 25 ans) sur une large moitié ouest du pays tandis que la sécheresse agricole, plus généralisée notamment sur l'est du pays, n'épargne pratiquement que les régions méditerranéennes.



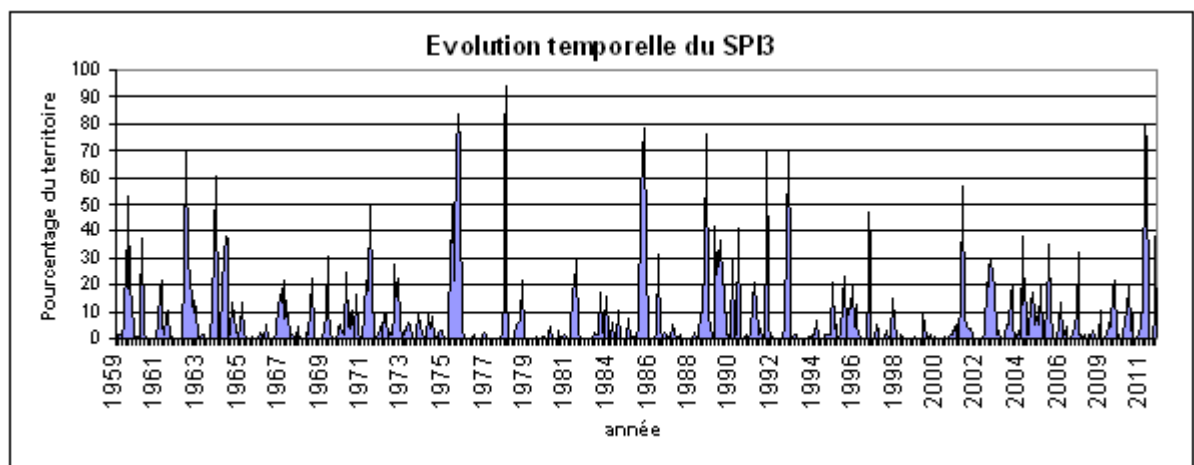
**Figure 5** : Comparaison de l'indice de sécheresse météorologique SPI3 (à gauche) et SSWI1 (à droite) en France en mai 2011. Voir Figure 3 pour la légende.

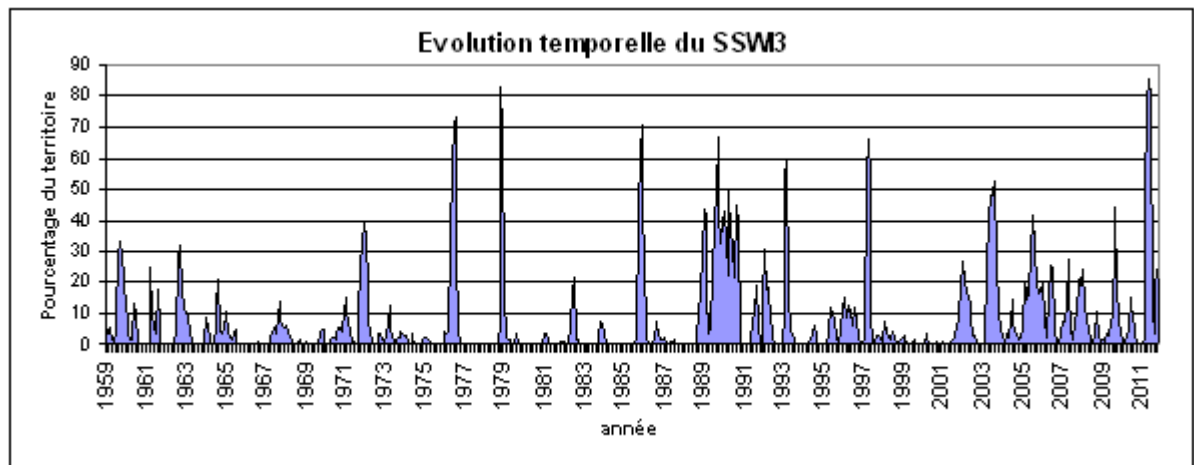
### 3.2 Qualification de la sécheresse printanière 2011

Ces indices permettent également d'appréhender le niveau global atteint par une sécheresse à l'échelle de la France en considérant la proportion du territoire où l'indice est en-dessous d'un seuil donné. La Figure 6 présente l'évolution de cette surface pour l'indice SPI et SSWI sur une profondeur temporelle de 3 mois (SPI3 et SSWI3) sur la période de 1958 à 2011 avec un seuil de 10% (durée de retour de 10 ans).

On peut ainsi identifier les périodes où la sécheresse affectait une part conséquente du territoire, par exemple l'été 1976, l'automne 1978 ou encore les trois années 1988 à 1990 et enfin 2011. La Figure 6 met en évidence la forte corrélation entre les déficits de précipitation et d'humidité du sol, mais aussi des différences notables. On peut ainsi remarquer que le déficit d'humidité du sol durant l'année 2003 n'est pas associé à un manque de précipitations. On notera enfin que la sécheresse du printemps 2011 a été l'évènement le plus fort sur notre territoire depuis au moins 1958 pour les déficits d'humidité des sols sur 3 mois.

L'accentuation de l'extension spatiale des sécheresses des sols depuis les années 1990 et notamment au cours de la dernière décennie 2000-2010 est à mettre en rapport avec la tendance climatique observée de l'assèchement des sols en France sur quasiment tout le territoire et en toute saison (Soubeyroux et al., 2011).





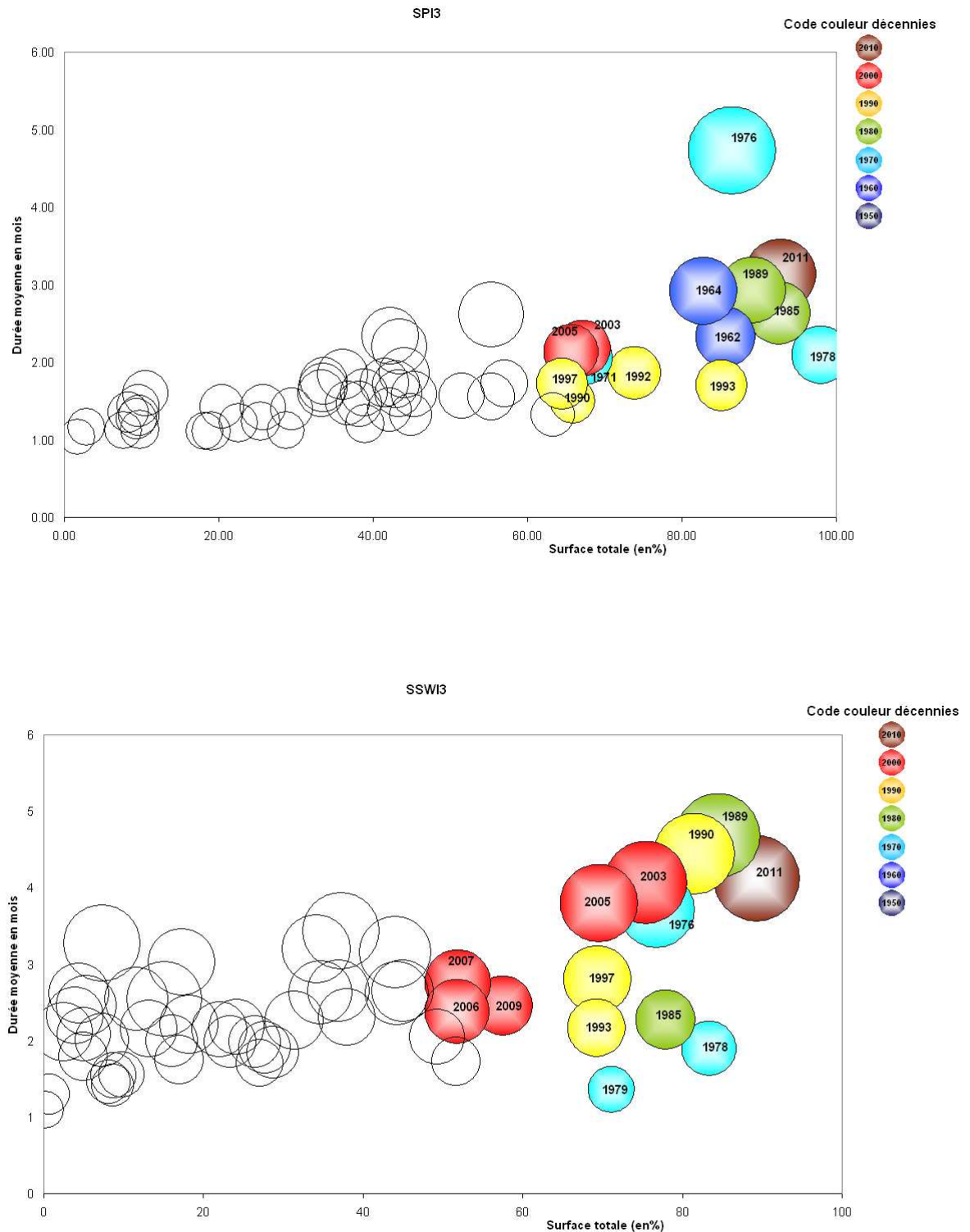
**Figure 6 :** *Superficie affectée par la sécheresse, en % de la France (SPI3 et SSWI3) de 1958 à 2011. L'échelle de temps des indices est de 3 mois et le seuil utilisé pour l'état de sécheresse correspond à une probabilité de 10 %.*

### 3.3 Suivi climatique des événements de sécheresse

En matière de suivi climatique, il est nécessaire de pouvoir analyser et comparer en temps réel l'intensité des différents épisodes météorologiques selon des critères synthétiques et adaptés à leurs conséquences.

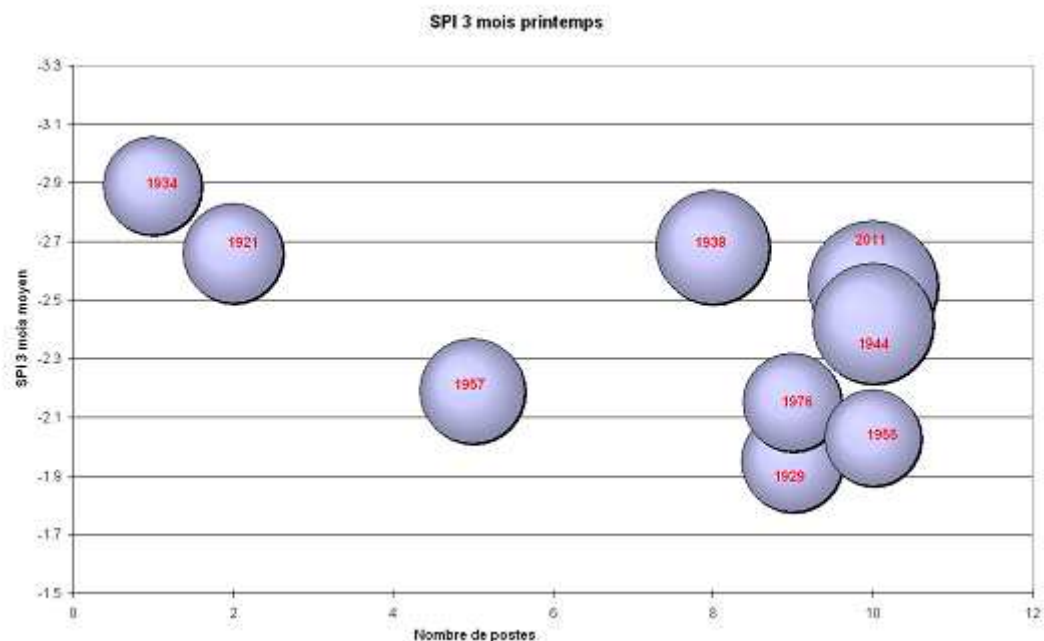
L'analyse des sécheresses au pas de temps saisonnier ou annuel peut être menée en prenant en compte l'évolution de l'indice local au-dessous d'un seuil de sécheresse prédéfini. Cette approche permet de caractériser chaque période (année ou saison) selon l'extension maximale de la sécheresse, la durée moyenne en dessous du seuil, la magnitude moyenne en dessous du seuil ainsi que la date de l'extension maximale de la sécheresse.

La Figure 7 montre pour un seuil de 10% la caractérisation annuelle des sécheresses depuis 1958 en fonction de la surface totale des sécheresses, la durée et la magnitude moyenne. La sécheresse de l'année 1976 prédomine du point de vue météorologique. La sécheresse de l'année 2011 a atteint pour sa part des records d'extension spatiale. On note également la fréquence des sécheresses des sols observée au cours des 10 dernières années : 6 années (2011, 2003, 2005, 2009, 2006 et 2007) se classent parmi les 14 années de plus forte extension spatiale depuis 1959.



**Figure 7:** Relations entre superficie totale (% de la France), durée moyenne (mois) et magnitude moyenne pour les événements de sécheresse indépendants identifiés avec le SPI3 (en haut) et le SSWI3 (en bas) et un seuil de probabilité de 10%. L'aire de chaque disque est proportionnelle à la magnitude moyenne.

Les évènements extrêmes tels que les sécheresses doivent être étudiés dans une perspective historique la plus longue possible (Duband, 2010). Nous avons ainsi appliqué le calcul du SPI sur 15 longues séries climatologiques de précipitation homogénéisées sur la France sur l'ensemble du XX<sup>e</sup> siècle (Moisselin et Dubuisson, 2006), régulièrement réparties sur le territoire. Sur la Figure 8, les sécheresses printanières depuis 1900 ont été caractérisées à partir de l'indice SPI3, de mars à mai, en fonction du nombre de stations climatologiques touchées et de la valeur moyenne de l'indice. La sécheresse de 2011 apparaît toujours comme la plus sévère depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle en termes d'expansion spatiale (estimée à travers le nombre de postes concernés) combinée à son intensité moyenne, devançant notamment celles de 1944 et de 1955.



**Figure 8:** Relations entre nombre de postes et intensité moyenne pour les sécheresses printanières SPI3 de 1900 à 2011.

## 4 Évolution attendue des sécheresses en climat futur

### 4.1 Les différentes projections climatiques

L'approche la plus classique dans les études d'impact du changement climatique est l'utilisation d'un modèle climatique global forcé par un scénario d'émission anthropique (gaz à

effet de serre et aérosols), régionalisé et forçant un modèle d'impact. L'étape de régionalisation de ces scénarios climatiques à grande échelle, nommée descente d'échelle, consiste à introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les modèles climatiques de grande échelle. Le modèle d'impact hydrologique est ici la partie Isba-Modcou de la chaîne SIM.

Cette suite d'opérations cumule des incertitudes nombreuses, introduites à chaque étape, et qu'il faut prendre en compte dans l'exercice de prospective exploitant les évolutions modélisées.

Trois expériences numériques ont ainsi été utilisées dans l'étude des sécheresses en France sous changement climatique. Elles ont été choisies en fonction des projections climatiques régionalisées existantes pour la France métropolitaine afin d'évaluer l'influence des différentes sources d'incertitude : modèles climatiques (GCMs pour Global Circulation Models), scénarios socio-économiques et méthodes de descente d'échelle. L'ensemble des projections climatiques exploitées dans le projet ClimSec est donné dans le Tableau 1. Les 3 expériences étudiées concernent :

- 6 GCMs utilisées pour le 4<sup>e</sup> rapport du GIEC (2007)
- 3 scénarios d'émissions : A2, A1B et B1
- 2 méthodes de descente d'échelle, par type de temps (Boé et al., 2006) dénommée TT et quantile-quantile (Déqué et al., 2007), dénommée QQ.

L'encadré 2 rappelle les différentes sources d'incertitudes dans les projections climatiques utilisées dans le projet ClimSec.

## **Les différentes sources d'incertitudes dans les projections climatiques**

### **1 Les scénarios d'émission (selon le 4<sup>e</sup> rapport du GIEC)**

*Les scénarios d'émission visent à représenter les évolutions plausibles des émissions de substances pouvant avoir des effets radiatifs à travers une classification par famille de perspectives socio-économiques selon la prédominance des objectifs économiques (famille A) ou environnementaux (famille B) dans un monde globalisé (chiffre 1) ou régionalisé (chiffre 2).*

*Les 3 scénarios pris en compte dans le projet ClimSec prennent en compte des évolutions très différentes :  
- le scénario A2 décrit un monde hétérogène avec un développement économique à orientation régionale conduisant à un accroissement continu de la population mondiale et une poursuite de l'augmentation de la concentration des GES au delà de 800 ppm en 2100.*

- le scénario B1 à l'inverse décrit un monde convergent mettant l'accent sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale permettant une stabilisation des concentrations en GES vers 550 ppm en milieu de siècle
- le scénario A1B propose un compromis entre ces deux évolutions dans un monde globalisé intégrant à part égale les objectifs économiques et environnementaux, conduisant à une stabilisation des concentrations des GES vers 700 ppm en fin de XXI<sup>e</sup> siècle.

## **2 Les modèles climatiques**

Les modèles climatiques utilisés pour les simulations du GIEC sont des modèles mathématiques capables de représenter l'évolution du système climatique dans ses différentes composantes (atmosphère, océan, biosphère, glace) et interactions. Les simulations demandées par le GIEC portent sur la période 1960-2100. Le modèle ARPEGE, développé par le Centre National de Recherche Météorologique de Météo-France a été notamment utilisé dans les travaux du projet ClimSec ainsi que 5 autres modèles disposant de données régionalisées sur la France.

## **3 La régionalisation**

Les projections globales des modèles climatiques demandent à être affinées à partir d'outils de régionalisation climatique, qu'il s'agisse de modèles à haute résolution et domaine limité ou de techniques statistiques dites de downscaling.

Dans le projet ClimSec, les résultats de 2 méthodes purement statistiques ont été examinés :

- la méthode dite par « type de temps » (Boé et al., 2006) génère des séries locales de précipitation ou de température en s'appuyant sur les résultats de régression multi-variée utilisant la distance d'un jour donné avec différents types de temps représentant la circulation générale.
- la méthode dite « quantile-quantile » est une méthode d'ajustement locale des valeurs prévues à partir de la distribution des valeurs observées (Déqué, 2007)

## **4 Les modèles d'impact**

Les modèles d'impact permettent d'étudier l'évolution d'un domaine dans son lien avec le climat. Dans le projet ClimSec, un seul modèle d'impact a été utilisé Isba-Modcou pour représenter l'hydrologie de surface.



Expérience	Scénario d'émissions	Modèle climatique	Méthode de descente d'échelle	Périodes
1	A1B	MRI-CGM2.3.2	TT	1961-200 & 2046-2065
		GISS-ER		
		GFDL-CM2.1		
		ECHAM5/MPI-OM		
		CGCM3.1(T63)		
		CNRM-CM3		
2	A1B	ARPEGEV4.6	TT	1960-2100
	B1			
	A2			
3	A2	SAMM	TT	1960-2100
			QQ	

**Tableau 1** : Projections climatiques utilisées dans le cadre du projet ClimSec. TT: types de temps; QQ : quantile-quantile.

Dans chacune de ces expériences, le modèle Isba a été forcé par les différentes projections climatiques régionalisées, pour obtenir les simulations hydrologiques sur le XXI<sup>e</sup> siècle.

Les indices standardisés précédemment définis ont été calculés tout au long du XXI<sup>e</sup> siècle en prenant la période 1961-1990 comme référence conformément aux recommandations de l'OMM. De nouveaux critères d'analyse des sécheresses ont été choisis pour mieux caractériser les évolutions spatio-temporelles des événements comme le temps passé en sécheresse (TPS) ou la proportion du territoire affectée par les sécheresses.

## 4.2 Caractéristiques générales de l'évolution attendue

Cette évolution a été étudiée principalement sur la base du modèle Arpège climat pour lequel des scénarios continus étaient disponibles sur l'ensemble du XXI<sup>e</sup> siècle mais s'avère conforme aux comparaisons faites avec les différents GCM en milieu de siècle.

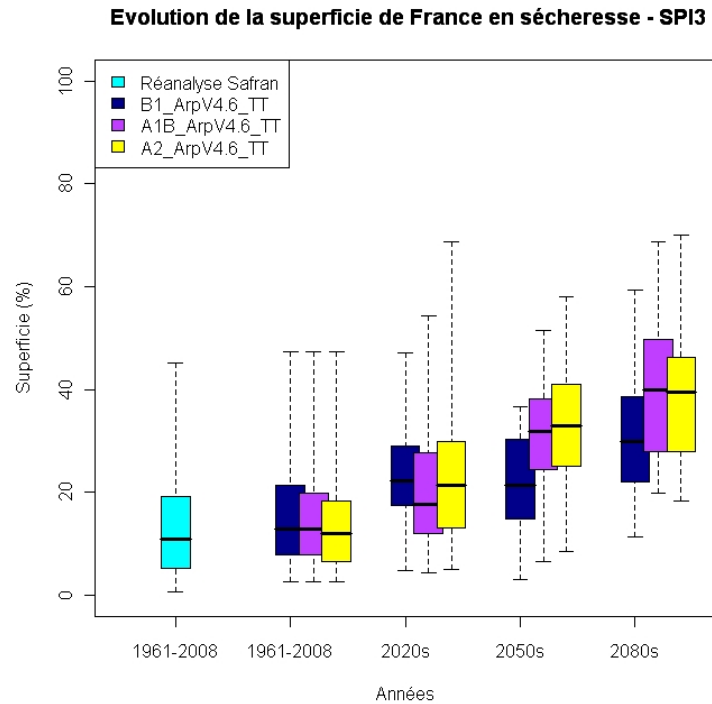
L'évolution générale des indices en climat futur présente tout d'abord une grande similitude quel que soit le scénario d'émissions B1, A1B ou A2 pris en compte (voir Figures 9 et 10). La capacité



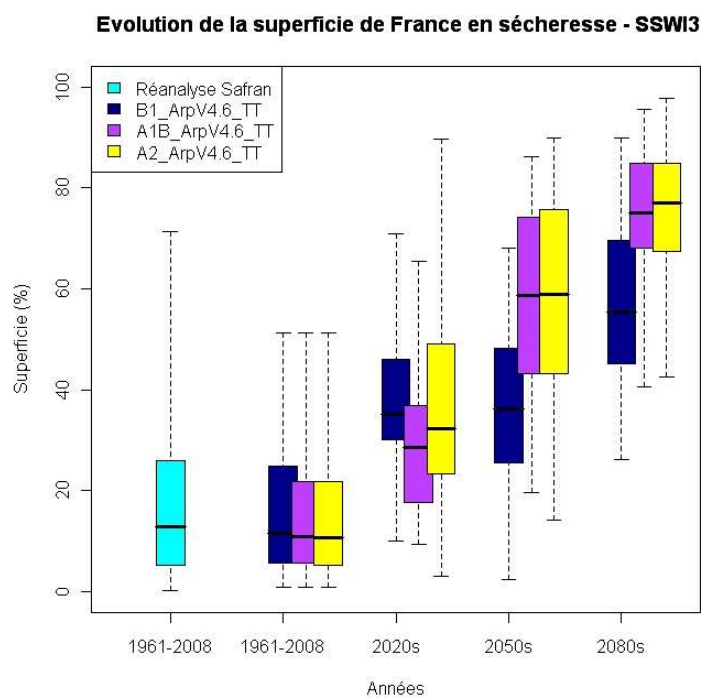
des modèles à représenter les caractéristiques des sécheresses en climat présent (période 1961-2008) a été vérifiée, y compris dans leurs caractéristiques spatio-temporelles (Vidal et al., 2012).

On peut ensuite identifier l'évolution des sécheresses météorologiques et agricoles, pour un pas de temps de 3 mois :

- pour le premier tiers du siècle (horizon 2020), il n'y a pas de changement notable des caractéristiques des sécheresses météorologiques par rapport à la période 1961-1990 tandis qu'une aggravation des sécheresses agricoles est déjà repérable ;
- au milieu du siècle (horizon 2050), des évolutions très significatives commencent à concerner les sécheresses agricoles. Des sécheresses inhabituelles en termes d'extension spatiale ou d'intensité apparaissent: une sécheresse exceptionnelle en climat présent, telle qu'observée en 1990 (valeur maximum sur la période 1961-2008) pour le SSWI3, pourra être fréquemment dépassée (4<sup>e</sup> quartile de la distribution) ;
- à la fin du siècle (horizon 2080), des sécheresses météorologiques plus fortes apparaissent également. Un événement tel que celui de 1976 (valeur maximum sur la période 1961-2008) pourra être alors fréquemment dépassé. La situation continue à s'aggraver de manière plus marquée pour les sécheresses agricoles et une grande partie du territoire pourrait connaître de très longues sécheresses du sol, quasiment sans retour à la situation normale par référence au climat actuel.



**Figure 9 :** Diagramme en boîtes (valeur minimale, 1<sup>er</sup> quartile, médiane, 3<sup>e</sup> quartile et valeur maximale) d'évolution entre 1961 et 2100 de la superficie affectée par les sécheresses météorologiques (SPI3), modérées à extrêmes, sur la France (seuil 16%) en fonction des scénarios d'émissions B1, A1B, A2 du modèle ArpegeV4.6, méthode de descente d'échelle type de temps (TT).



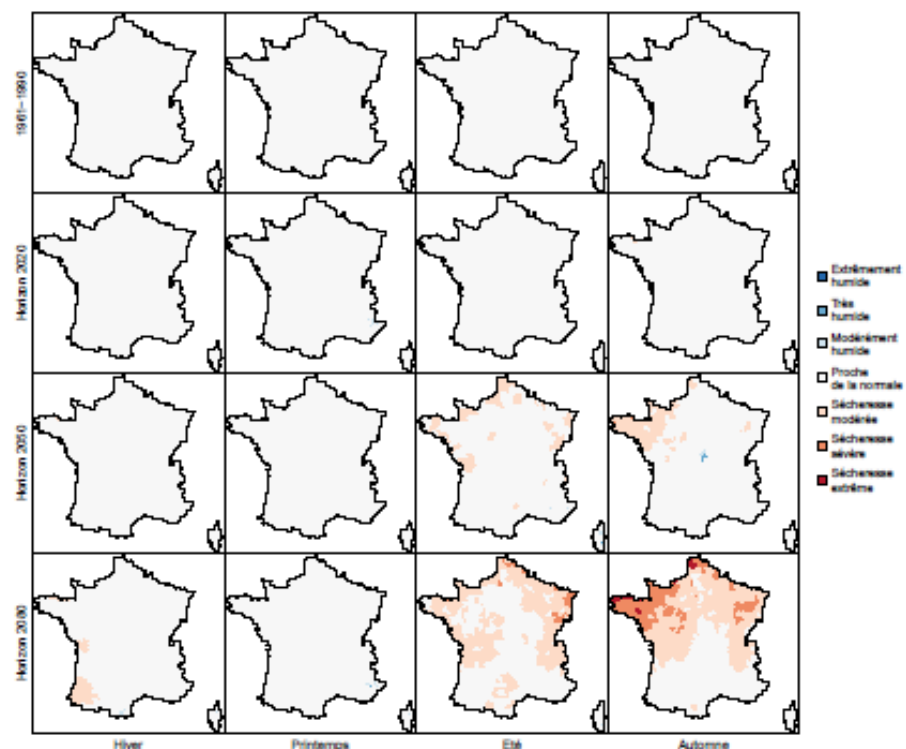
**Figure 10 :** Même graphique que la figure 9 pour les sècheresses agricoles sur 3 mois (SSWI3).

### 4.3 Évolution saisonnière des sécheresses

La connaissance de l'évolution saisonnière de l'intensité moyenne des sécheresses a également une grande importance pour les impacts sur les écosystèmes et les activités économiques, agricoles notamment.

Sur la base du modèle ARPEGE V4.6 scénario A2, les Figures 11 et 12 présentent une cartographie moyenne sur 30 ans des indices SPI3 et SSWI3 pour les mois de février, mai, août et novembre au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, représentant respectivement les sécheresses hivernales, printanières, estivales et automnales.

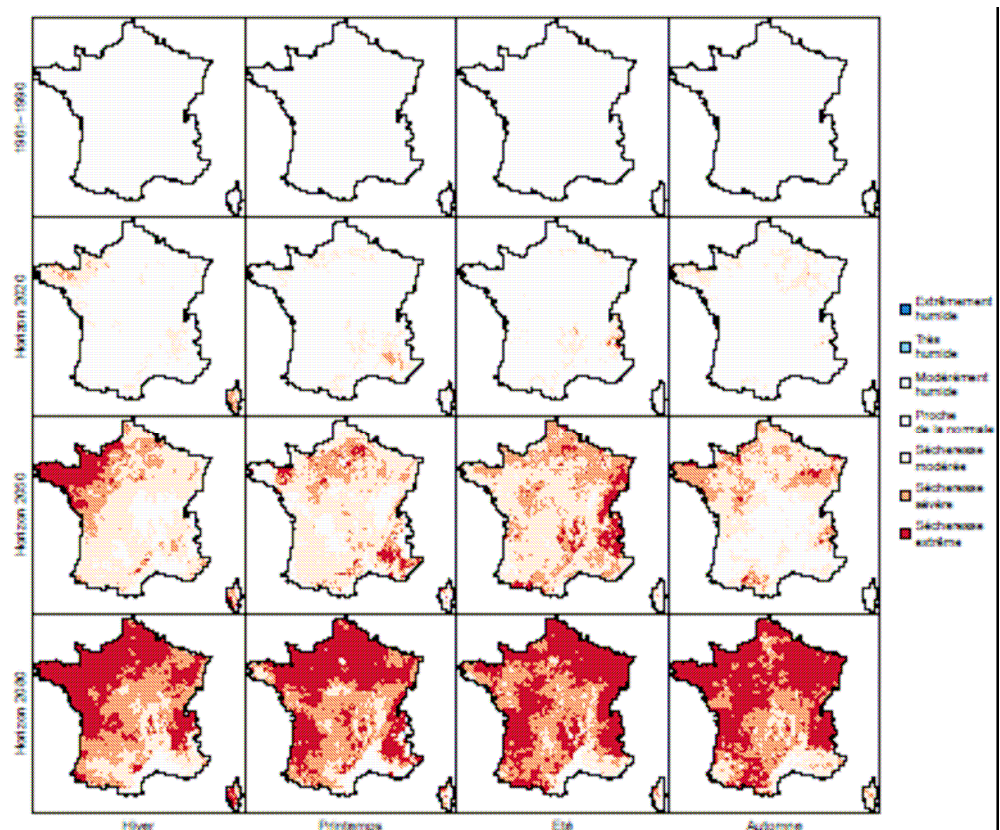
Pour les sécheresses météorologiques, si on ne note aucune évolution sensible quelle que soit la saison jusqu'en 2050, les sécheresses estivales, voire automnales s'aggravent sur une grande partie du pays en fin de siècle. On ne constate pas d'évolution sur les sécheresses hivernales et printanières.



**Figure 11 :** Évolution temporelle moyenne de l'indice SPI3 au cours du XXI<sup>e</sup> siècle selon les saisons à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2, méthode de descente d'échelle types de temps.

L'évolution attendue pour les sécheresses agricoles présente des caractéristiques assez différentes.

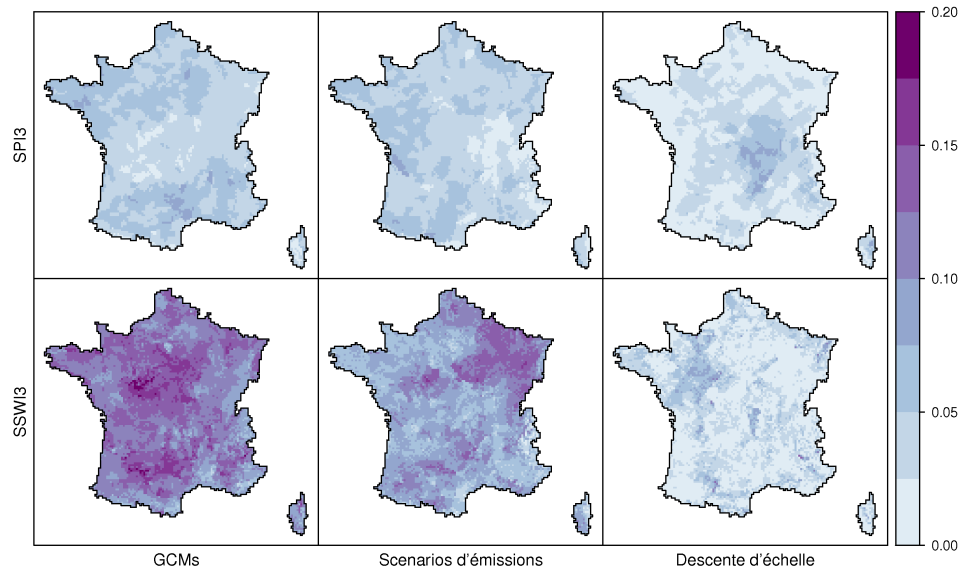
L'aggravation est continue au cours du XXI<sup>e</sup> siècle et concerne toutes les saisons, y compris l'horizon proche 2020. À l'horizon 2050, l'aggravation se retrouve de manière quasi équivalente en toute saison et toute région. En fin de siècle, les sécheresses extrêmes prédominent dans la plupart des régions, à l'exception des régions méditerranéennes.



**Figure 12:** Idem figure 9 pour l'évolution des sécheresses SSWI3

#### 4.4 Incertitudes

Les différentes incertitudes étudiées dans chacune des trois expériences (scénarios socio-économiques, modèles climatiques et méthodes de descente d'échelle) ont été aussi comparées entre elles sur la période centrale du XXI<sup>e</sup> siècle (2046-2065) pour laquelle l'ensemble des jeux de données est disponible. La Figure 13 présente les cartographies de l'écart type obtenu pour chaque expérience pour les indices SPI3 et SSWI3.



**Figure 13** : Cartographie comparative des écarts types entre les valeurs des indices SPI3 ou SSWI3 (en ligne) pour les projections issues des expériences sur les modèles climatiques (GCMs), les scénarios d'émission et les méthodes de descente d'échelle

Les incertitudes s'avèrent relativement de niveau équivalent pour les 3 expériences pour le SPI3 (ligne du haut) tandis que les incertitudes des GCMs prédominent sur celles des scénarios d'émissions et de descente d'échelle, pour le SSWI3.

On note aussi que l'incertitude sur l'indice SSWI3 est généralement plus forte que celle sur le SPI3, notamment pour les GCMs et les scénarios d'émission.

## 5 Conclusions

Les travaux sur l'analyse des sécheresses en France menés dans le cadre du projet ClimSec ont permis de produire de nouveaux jeux de données hydrométéorologiques issues du modèle SIM avec une climatologie étendue débutant en 1958. Ces données trouvent de nombreuses applications dans le domaine opérationnel (Bulletin de Situation Hydrologique par exemple) ou la recherche, notamment sur la variabilité du climat. L'extension de cette base de données au début

du XX<sup>e</sup> siècle est à l'étude dans le cadre du projet PRECLIDE<sup>3</sup> concernant la prévisibilité climatique décennale. Les nouveaux indices de sécheresse définis dans le cadre du projet sont aujourd'hui utilisés pour la caractérisation en temps réel des sécheresses avec les services en charge du suivi hydrologique national. Ces outils ont ainsi permis de qualifier le caractère exceptionnel de la sécheresse 2011, tant pour son extension spatiale que son caractère saisonnier précoce.

Ces méthodes sont aussi adaptées pour les études en climat futur basées sur les projections climatiques régionalisées disponibles sur la métropole. L'utilisation des indices standardisés permet une représentation originale de la perception des événements futurs. Il a été montré notamment que le choix de la période de référence pour le calcul de l'indice pouvait être un outil pour illustrer les stratégies définies pour l'adaptation au changement climatique (Vidal et al., 2012). Utiliser une période de référence passée comme 1961-1990 correspond à une approche sans prise en compte de l'adaptation. Inversement, une référence climatologique glissante basée sur les 30 dernières années représenterait l'évolution des sécheresses dans un contexte sociétal d'adaptation continue.

L'analyse de l'évolution attendue des sécheresses à partir de différentes projections climatiques a mis en évidence des tendances robustes. Même sans évolution des sécheresses météorologiques, une aggravation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes liés à un déficit d'humidité du sol est à attendre dès la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Cette évolution est conforme aux tendances déjà observées sur l'humidité moyenne des sols ou l'extension de la superficie des sécheresses agricoles (Soubeyroux et al., 2011). Dans la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle, les événements de sécheresse déduits des projections climatiques présentent des caractéristiques totalement différentes des événements rencontrés jusqu'à présent. Ces évolutions pourraient marquer un changement notable de notre climat, concernant particulièrement les

---

<sup>3</sup> Le projet PRECLIDE : PREvisibilité CLImatique DEcennale, soutenu par la Fondation BNP Paribas est le fruit du partenariat Météo-France, CNRS et Cerfacs

phénomènes extrêmes, pouvant nécessiter un effort majeur d'adaptation commençant à être traduit dans les textes réglementaires tels que le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique publié en 2011.

**Remerciements** : Ces travaux ont été réalisés avec l'appui financier de la Fondation MAIF et de son Directeur Hubert Oliviero et la mobilisation de l'équipe projet (Serge Planton et Aurélien Ribes du CNRM-GAME, Laurent Terray et Christian Pagé du CERFACS, Florence Habets de l'UMR Sisyphe, Martine Baillon et Laurent Franchistéguy de la Direction de la Climatologie de Météo-France) auxquels les auteurs transmettent tous leurs remerciements.

## Bibliographie :

- Boé J., Terray L., Habets F. et Martin E., (2006), A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditions resampling, *Journal of Geophysical Research*, 111, D23106. DOI: 10.1029/2005JD006889
- Boé (2007) *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier
- Caballero Y., Morel S., Habets F., Noilhan J., Le Moigne P., Lehenaff A. et Boone A. (2007), Hydrological sensitivity of the Adour Garonne river basin to climate change, , *Water Resources Research*, **43**, W07448. DOI : 10.1029/2005WR004192
- Déqué M. (2007) Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57(1-2) 16-26. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.030
- Duband, D. (2010), Rétrospective hydro-pluviométrique des étiages rares depuis 140 ans, dans l'ouest de l'Europe (bassins Loire, Seine, Rhin, Rhône, Pô), *La Houille Blanche*, N°4, pp. 51-59, DOI : 10.1051/lhb/2010041
- Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Vienne, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S. et Rieu, J., 2009: *Rapport final du projet REXHySS. Programme GICC*. 62 pp
- GIEC, 2007: Résumé à l'intention des décideurs. In: Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation. Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.-L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Segui, P., Rousset-Regimbeau, F. et Vienne, P. (2008), The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research*, 113, D06113. DOI : 10.1029/2007JD008548
- McKee, T., Doesken, N. et Kleist, J. (1993), The relationship of drought frequency and duration to time scales. Dans: *Preprints of the 8th Conference on Applied Climatology*, p. 179-184, Anaheim, California.
- Moisselin, J.-M. et Dubuisson, B., (2006), Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XX<sup>e</sup> siècle en France. *La Météorologie*, 54, 33-42.
- Planton, S., Dequé, M., Chauvin, F. et Terray, L. (2008) Expected impacts of climate change on extreme climate events, *Comptes Rendus Geoscience*, 340, 564-574, doi :10.1016/j.CRTE.2008.07.009



Soubeyroux, J.-M., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Noilhan, J., Baillon, M., Regimbeau, F., Vidal, J.-P., Le Moigne, P. et Morel, S. (2008), Safran–Isba–Modcou (SIM) – Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études, *La Météorologie*, 63, 40-45

Soubeyroux, J.-M., Vidal, J.-P., Baillon, M., Blanchard, M., Ceron, J.-P., Franchistéguy, L., Regimbeau, F., Martin, E. et Vincendon, C. (2010), Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou, *La Houille Blanche*, 5, 30-39, DOI : 10.1051/lhb/2010051

Soubeyroux, J.-M., Vidal, J.-P., Najac, J., Kitova, N., Blanchard, M., Dandin, P., Martin, E., Pagé, C. et Habets, F., 2011 : Projet ClimSec - Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol, rapport final, Météo-France, CNRM-GAME, CERFACS, UMR Sisyphe, Cemagref, 72 pp

Vidal, J.-P., Martin, E., Baillon, M., Franchistéguy, L. et Soubeyroux, J.-M. (2010a), SAFRAN 50-year high-resolution meteorological reanalysis over France. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627–1644. DOI : 10.1002/joc.2003

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M. et Baillon, M. (2010b), Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(3), 459-478. DOI : 10.5194/hess-14-459-2010

Vidal, J.-P., Martin, E., Kitova, N., Najac, J. et Soubeyroux, J.-M. (2012), Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(2), 1619-1670. DOI : 10.5194/hessd-9-1619-2012

Wilhite, D. A. et Glantz, M. H. (1985), Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111-120